

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. SEJARAH PENEMUAN NEUTRON

Pada tahun 1930 fisikawan Jerman W. Bothe dan H. Becker menembaki Berilium dengan partikel alfa dan menemukan bahwa ada pancaran radiasi yang mampu menembus bahan-bahan dengan mudah. Bothe dan Becker berkeyakinan bahwa radiasi bukan terdiri dari partikel bermuatan, dan menganggapnya bahwa radiasi itu adalah sinar gamma.

Banyak fisikawan-fisikawan lain yang tertarik pada radiasi ini diantaranya adalah F. Joliot dan Irene Curie yang mengamati jika radiasi tersebut dijatuhkan pada lempengan parafin bahan yang kaya hidrogen, protonnya terpukul keluar.

James Chadwick mengusulkan hipotesis alternatif bahwa radiasi tersebut terdiri dari partikel netral yang massanya hampir sama dengan massa proton. Kenetralan listrik partikel inilah yang menyebabkan namanya menjadi neutron.

Pengukuran lebih teliti dilakukan oleh Chadwick dan Goldbaher dengan menggunakan energi ikat deuterium (E_d). Massa neutron ditentukan sebagai berikut

$$M_n = M_d - M_p + E_d/c^2 \dots\dots\dots(2-1)$$

dengan m_d adalah massa deuterium dan m_p adalah massa proton yang sudah diketahui. Sedang E_d ditentukan dari energi- γ pada tangkapan neutron oleh proton (menurut Chipp et. al., $E_d = (2,225 \pm 0,003 \text{ MeV})$).

Ternyata $M_n = 1,008665$ sma (satuan massa atom) dan lebih berat daripada proton. Diluar inti, neutron meluruh dengan umur paro ($11,7 \pm 0,3$) menit menjadi proton, elektron dan anti neutrino.



Gejala ini pertama kali diamati oleh Snell pada tahun 1948 dan hanya mungkin terjadi bila $M_n > M_p$ (K. H. Beckurts. 1964)

Secara lengkap sifat-sifat neutron disajikan pada tabel 2-1 dengan sifat-sifat proton sebagai pembanding.

(K. H. Beckurts. 1964)

Tabel 2-1. : Sifat-sifat neutron dan proton

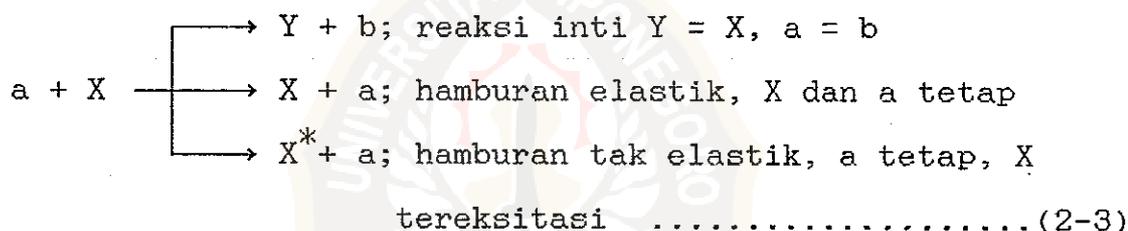
	neutron	proton
partikel	n	p
massa (gram)	$1.674663 \cdot 10^{-24}$	$1.672357 \cdot 10^{-24}$
massa (sma)	1.008665	1.00776
massa (MeV)	939.6	938.3
muatan (e)	0	+1
umur paro (menit)	$11,7 \pm 0,3$	mantap
spin	1/2	1/2

Penemuan neutron sekaligus mengakhiri teka-teki partikel penyusun inti selain proton. Pada tahun yang sama W. Heisenberg sampai pada kesimpulan bahwa inti hanya tersusun atas proton dan neutron.

2.2. TEORI REAKSI INTI

2.2.1. Mekanisme reaksi inti

Reaksi inti adalah suatu proses interaksi inti dengan inti atau inti dengan nukleon sehingga terjadi perubahan inti. Apabila inti X ditumbuk oleh partikel a akan terjadi beberapa kemungkinan ^(Nargolwala dan Edwin P. 1973)



Secara umum reaksi inti dapat ditulis sebagai berikut



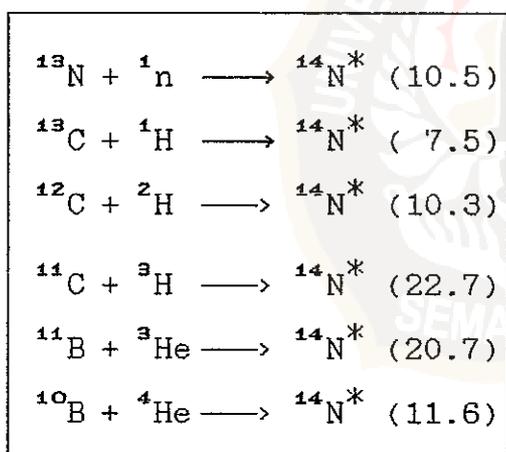
atau dalam notasi singkat ditulis sebagai berikut



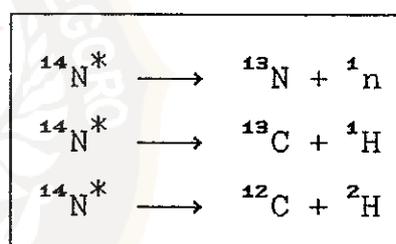
dengan a adalah partikel penembak, X inti sasaran, M inti majemuk sebagai perantara, Y partikel hasil dan b partikel yang dipancarkan.

Dalam banyak kasus, inti majemuk terbentuk lebih dahulu. Nomor atom dan nomor massa inti majemuk merupakan penjumlahan nomor atom dan nomor massa inti target dan partikel penembaknya. Suatu inti majemuk dapat terbentuk dan meluruh melalui berbagai macam cara, tergantung energi eksitasinya (tabel 2-2). Inti majemuk mempertahankan keadaan eksitasinya sampai suatu nukleon atau sekelompok nukleon tertentu memiliki fraksi energi yang cukup besar dari energi eksitasi untuk melepaskan diri dari inti. (Beiser, 1991)

Tabel 2-2(a)
Pembentukan inti majemuk $^{14}_7\text{N}$
dan energinya dalam Mev.
(Beiser, 1991)



Tabel 2-2(b)
Peluruhannya dengan energi
eksitasi \pm 12 MeV



Reaksi inti juga memenuhi hukum kekekalan energi. Besarnya energi reaksi (Q) untuk reaksi X(a,b)Y dapat dihitung dengan menggunakan kesetaraan massa-energi Einstein, yaitu :

$$Q = \Delta m c^2 \dots\dots\dots(2-5a)$$

dengan Δm adalah selisih massa sesudah dan sebelum reaksi, dan untuk reaksi $X(a,b)Y$ besarnya adalah:

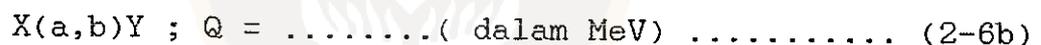
$$\Delta m = (m_a + m_x) - (m_b + m_y) \dots\dots\dots(2-5b)$$

Bila Q positif, reaksi inti melepaskan sejumlah energi (reaksi eksoenergetik) dan terjadi penyusutan massa total. Bila negatif, reaksi inti membutuhkan sejumlah energi (reaksi endoenergetik) dan terjadi kenaikan massa total. Bila nol, terjadi hamburan dan massa total tetap.

Biasanya Q dinyatakan dalam MeV (1 sma setara dengan 931,48 MeV) dan reaksi inti ditulis secara lengkap sebagai berikut :



atau



Reaksi inti diklasifikasikan berdasarkan jenis dan energi partikel penembak, inti target, dan mekanisme. (Marsongkohadi. 1978)

Menurut Dr. Hans Kiefer dan Dr. Rupprecht Maushart dalam bukunya "*RADIATION PROTECTION MEASUREMENT*"

Berdasarkan energinya, neutron terbagi menjadi :

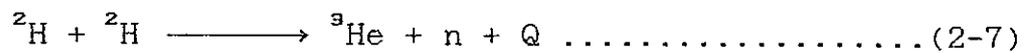
1. Neutron lambat ($E_n < 0,5 \text{ eV}$)
2. Neutron menengah ($0,5 \text{ eV} \leq E_n < 10 \text{ MeV}$)
3. Neutron cepat ($10 \leq E_n \leq 14 \text{ MeV}$)
4. Neutron relativistik ($E_n > 14 \text{ MeV}$)

2.3. PRODUKSI NEUTRON OLEH GENERATOR NEUTRON

Neutron yang dihasilkan oleh penembakan suatu sasaran dengan isotop hidrogen ^2H dicetuskan oleh Oppenheimer dan Phillips. Menurut teori mereka, karena deuteron berenergi ikat rendah yaitu sekitar 2 MeV, maka berkelakuan sebagai gabungan atau kombinasi yang lemah dari sebuah proton dan neutron. Ketika mendekati suatu inti atom, gaya tolak elektrostatis dari inti cenderung membelokkan proton, sedangkan neutron tidak terpengaruh oleh gaya tersebut. Apabila energi deuteron yang datang pada inti atom melampaui energi ikat neutron-proton, deuteron dapat pecah dan proton akan ditolak. Tetapi neutron akan memasuki inti sasaran karena neutron tidak terpengaruh potensial coulomb sebab neutron tidak bermuatan listrik. Proses dua tingkat ini diikuti oleh satu reaksi inti pada energi deuteron rendah, yang pada umumnya tidak cukup kuat untuk mengeluarkan suatu partikel bermuatan. Tetapi karena inti dalam keadaan tereksitasi, maka inti akan kehilangan kelebihan energinya dengan memancarkan radiasi Gamma. Reaksi inti jenis (d,p) sangat umum terjadi hampir pada semua unsur, dan pada energi deuteron rendah berlaku teori Oppenheimer Phillips. (Lewis, 1980)

Pada energi datang yang tinggi, inti dapat menyerap deuteron sebagai satu unit dalam bentuk inti gabungan. Reaksi-reaksi induksi partikel bermuatan jenis ini bersaing dengan reaksi lain, sedangkan derajat persaingan tersebut tergantung pada energi partikel yang datang.

Salah satu reaksi yang bersaing, adalah reaksi (d,n). Sejumlah besar dari reaksi-reaksi dalam katagori ini telah dilaporkan, terutama dengan sasaran yang nomor massanya rendah. Sebagai contoh adalah deuteron dengan energi kira-kira sama dengan nol yang berinteraksi dengan inti deuterium menghasilkan neutron dengan energi kinetik berorde 2,5 MeV dari reaksi :



Jika sasaran terdiri dari atom-atom tritium, dihasilkan neutron dengan energi kinetik sekitar 14 MeV oleh reaksi



Mengingat mekanisme Oppenheimer Phillips dan energi ikat deuteron yang rendah serta dengan mengabaikan penghalang coulomb, maka mengakibatkan deuteron ideal sebagai suatu partikel yang dipercepat atau partikel penembak untuk akselerator-akselerator tegangan rendah. Reaksi jenis kedua tersebut di atas biasanya disebut dengan reaksi D-T dan merupakan sumber neutron energi tinggi (14 MeV). Hasil neutron yang melimpah dari reaksi D-T membuat reaksi tersebut sangat penting dan bermanfaat untuk aplikasi analisis yang memerlukan sensitivitas tinggi.

2.4. Interaksi radiasi neutron dengan materi

Neutron adalah partikel penyusun inti (nukleon) yang tak bermuatan dan memiliki massa yang hampir sama dengan massa proton. Oleh karena partikel tersebut tidak bermuatan maka dalam gerakannya tidak terpengaruh medan coulomb atau dapat dikatakan bahwa neutron hanya berinteraksi dengan inti atom dari bahan yang dilaluinya.

Ada beberapa mekanisme yang terjadi apabila neutron melewati suatu bahan, diantaranya adalah hamburan elastik, hamburan tidak elastik, reaksi fisi dan reaksi tangkapan.
..... (Tjipta. 1982)

II.4.1. Hamburan elastik

Pada cara ini neutron menumbuk inti dengan cara yang sama seperti bola kelereng yang bertumbukan satu sama lainnya. Di dalam tumbukan tersebut neutron kehilangan sebagian energinya yang berpindah pada inti sasaran. Seluruh energi pindah ini menjadi energi kinetik inti sasaran dan walaupun inti mendapat tambahan energi dari luar, tetapi tambahan energi ini tidak mampu membuat inti tereksitasi. Proses hamburan elastik ini mengakibatkan energi neutron setelah proses tumbukan menjadi berkurang, dan dinyatakan dalam persamaan :

(PUSDIKLAT-BATAN "Kumpulan Proteksi Radiasi Tingkat Teknisi")

$$E = E_0 \frac{(M_A^2 + 2M_A \cos \theta + 1)}{(M_A + 1)} \dots \dots \dots (2-9)$$

dengan E_0 adalah energi neutron yang datang, M_A adalah massa inti (dalam sma), θ adalah sudut hamburan dan E adalah energi neutron setelah reaksi. Dari perumusan di atas maka neutron akan kehilangan energi terbesar apabila terjadi tumbukan frontal (sudut hamburan = 180°).

Untuk θ tertentu kehilangan energi menjadi besar apabila M_A kecil. Jadi moderator neutron yang baik harus terdiri dari unsur yang mengandung inti-inti dengan M_A kecil. Apabila tumbukan terjadi dengan proton ($M_A = 1$) maka persamaan (2-9) menjadi $E = 0,5 E_0 (1 + \cos \theta)$.

Menurut hukum tumbukan yang berlaku, maka unsur-unsur ringan yang massa intinya mendekati massa neutron adalah unsur-unsur yang paling baik untuk menurunkan energi neutron. Karena material ini dapat menyerap sebagian energi neutron setiap kali terjadi tumbukan.

Kebanyakan reaksi yang terjadi pada neutron-neutron cepat adalah jenis reaksi ini.

Bahan dengan inti yang demikian itu misalnya air, parafin dan beton sering digunakan sebagai penahan radiasi.

2.4.2. Hamburan tak elastik

Pada proses ini neutron memberikan sebagian energinya pada bahan yang ditembusnya dengan mengeksitasi inti sasaran. Perbedaan antara hamburan elastik dengan hamburan tak elastik adalah pada hamburan elastik meskipun inti mendapat energi tambahan dari neutron tetapi inti atom tidak tereksitasi. Sedangkan pada hamburan tak

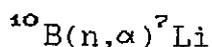
elastik inti atom yang menerima sebagian energi kinetik dari neutron menjadi tereksitasi dan akan kembali ke tingkat dasar dengan memancarkan radiasi- γ ($E_{k_n} > E_{k_n} + E_{k_{inti}}$). Tumbukan tak elastis ini hanya mungkin terjadi untuk neutron berenergi tinggi dengan tenaga 14 MeV atau lebih. (Dr. Hans Kiefer dan Ruppreht Maushart)

2.4.3. Reaksi tangkapan

Reaksi tangkapan adalah reaksi dimana neutron memberikan seluruh energinya sehingga neutron diserap oleh inti atom. Inti akan mengalami transmudasi inti dalam bentuk inti baru dengan nomor atom dan nomor massa yang berbeda dengan inti semula dan mengakibatkan terpancarnya radiasi lain seperti sinar gamma, proton, deuteron, alpha atau radiasi lainnya.

Reaksi ini terjadi pada hampir semua reaksi neutron termal (Neutron dengan energi $\approx 0,025$ eV). (Tjipta, 1982)

Salah satu contoh reaksi tangkapan neutron adalah :



2.4.4. Reaksi fisi

Reaksi fisi merupakan reaksi antara neutron dengan inti berat (Uranium, Thorium, Plutonium) dan menghasilkan dua buah nuklida yang mempunyai massa yang hampir sama dengan disertai pancaran 2-3 neutron berenergi tinggi.

(PUSDIKALAT-BATAN "Kumpulan Proteksi Radiasi Tingkat Tekni

Neutron-neutron lambat dapat menyebabkan terjadinya reaksi ini.

2.5. Atenuasi neutron

Pengurangan energi neutron pada saat melewati bahan terjadi karena adanya proses hamburan elastik, hamburan tak elastik dan serapan. Neutron termal dan neutron-neutron yang mempunyai energi mendekati termal mempunyai tampang lintang serapan yang besar, sehingga akan relatif lebih mudah terserap oleh bahan daripada neutron berenergi tinggi (neutron cepat). ^(Tjipta. 1982)

Hamburan tak elastik biasanya menghasilkan penurunan energi neutron yang besar, tetapi proses ini hanya mungkin terjadi untuk neutron cepat dengan elemen-elemen berat yang merupakan jenis penghambur yang paling efektif. Tampang lintang hamburannya akan bertambah besar dengan bertambahnya energi neutron dan nomor atom bahan perisai. Atom-atom yang ringan seperti hidrogen tidak dapat menghasilkan hamburan tak elastik karena hidrogen tidak memiliki tingkat eksitasi.

Hamburan elastik diperlukan untuk menurunkan energi neutron ke daerah termal. Pada proses ini neutron akan menyerahkan energinya apabila bertumbukan dengan bahan dengan nomor atom yang rendah, misalnya air dan parafin.

Jadi dalam hal menahan radiasi neutron proses yang diperlukan adalah : ^(Tjipta. 1982)

1. Proses perlambatan neutron cepat dengan hamburan-hamburan tak elastik menggunakan elemen-elemen berat.

2. Proses perlambatan lebih lanjut dengan menggunakan elemen-elemen ringan.
3. Proses serapan neutron.

Dengan adanya interaksi-interaksi tersebut akan menyebabkan pengurangan intensitas neutron, sehingga apabila memungkinkan maka perisai terhadap radiasi neutron yang baik adalah perisai yang merupakan kombinasi antara bahan dengan atom-atom ringan (seperti hidrogen) dengan elemen-elemen berat. Disamping itu perlu diperhatikan untuk menggunakan bahan-bahan perisai radiasi dengan tampang lintang neutron yang besar karena semakin besar harga tampang lintang maka semakin banyak neutron yang terserap oleh bahan tersebut.

2.6. Pengertian Tampang lintang

Interaksi neutron dengan materi diukur dengan suatu besaran yang dikenal sebagai tampang lintang, yang dapat dijelaskan dengan cara berikut: (Beiser, 1991)

Ditinjau lempeng cuplikan dengan tebal dx , luas A , serta mengandung N atom per satuan volume, maka jumlah atom total N_1 dalam cuplikan adalah $N.A.dx$. Jika tampang lintang interaksi setiap inti adalah σ maka tampang lintang interaksi total seluruh inti adalah $\sigma.N.A.dx$. Jika terdapat n partikel penembak yang mengenai cuplikan, maka banyaknya atom yang berinteraksi (dn) dalam lempengan dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\text{Partikel berinteraksi}}{\text{Partikel datang}} = \frac{\text{Tampang lintang total}}{\text{Luas target}}$$

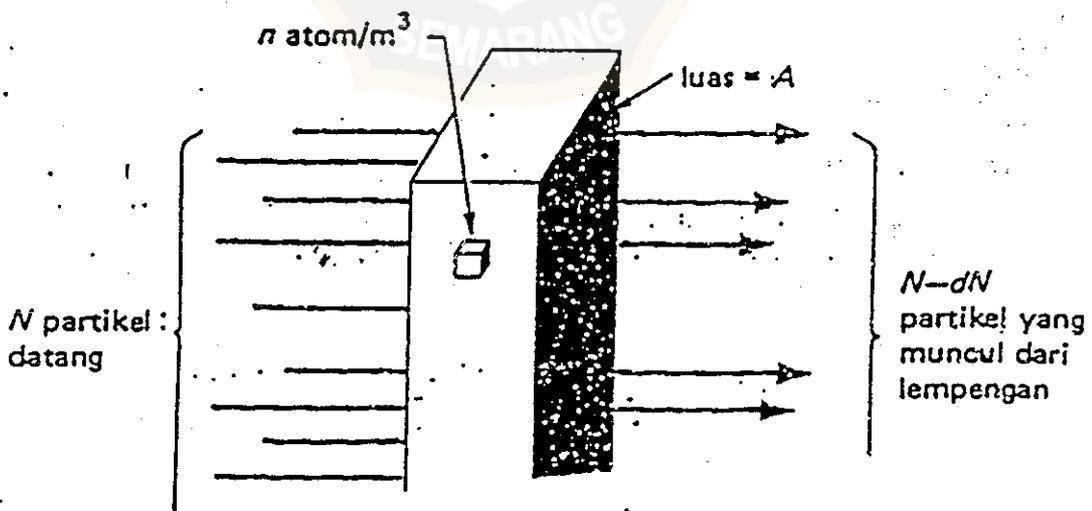
$$\frac{dn}{n} = \frac{N \cdot A \cdot \sigma \cdot dx}{A} = N \cdot \sigma \cdot dx \dots \dots \dots (2-10a)$$

Secara fisis, setiap partikel hanya dapat berinteraksi satu kali, sehingga dn partikel dapat dipindahkan dari berkas ketika berkas tersebut melewati tebal dx . Jadi harus dimasukkan tanda minus pada persamaan (3-10a) sehingga menjadi:

$$\frac{dn}{n} = - N \cdot \sigma \cdot dx \dots \dots \dots (2-10b)$$

dan dengan integrasi didapatkan :

$$n = n_0 e^{-\sigma N dx} \dots \dots \dots (2-10c)$$



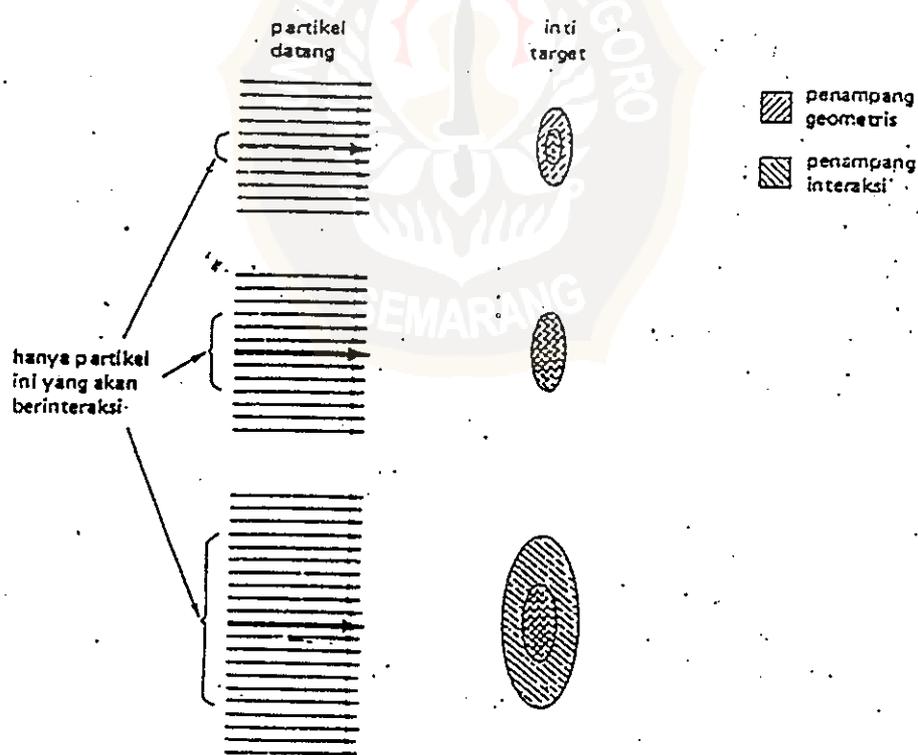
Gambar 2-1 : Hubungan antaraampang lintang interaksi dengan intensitas berkas. (Betser, 1991)

Jadi tampang lintang menyatakan peluang partikel penembak berinteraksi dengan cara tertentu dengan partikel target. Tampang lintang ini bervariasi menurut energi partikel datang serta proses yang terjadi. Tampang lintang interaksinya bisa lebih besar atau lebih kecil dibanding tampang lintang geometris partikel itu. ^(Betsler, 1991)

Jari-jari suatu nuklida berat kira-kira 10^{-12} cm, sehingga tampang lintang geometrisnya sekitar 10^{-24} cm².

Karena harga tampang lintang reaksi berkisar pada harga tampang lintang geometrisnya, maka dipakai satuan barn (b) untuk tampang lintang reaksi.

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 100 \text{ fm}^2$$



Gambar 2.2 : Tafsiran geometris konsep tampang lintang. Tampang lintang interaksi tidak selalu sama dengan tampang lintang geometris. ^(Betsler, 1991)

Neutron berinteraksi dengan inti melalui berbagai cara. Tiap interaksi mempunyai peluang terjadi yang berbeda, sehingga dibutuhkan tampang lintang yang berbeda untuk menjelaskan peluang terjadinya tiap jenis reaksi. Besar tampang lintang ditentukan oleh jenis dan energi partikel penembak, sudut datang, serta jenis partikel target. Jumlah semua tampang lintang dari interaksi yang mungkin terjadi antara neutron dengan suatu bahan disebut tampang lintang total (σ_T) dan menyatakan peluang interaksi antara neutron dengan bahan yang bersesuaian..... (Lamarsh. 1966)

Untuk neutron dengan energi 14 MeV, tampang lintang total dinyatakan sebagai berikut: (Nargolwalla. 1973)

$$\sigma_t = \sigma_n + \sigma_{n,\gamma} + \sigma_{2n} + \sigma_f + \sigma_{n,\alpha} + \sigma_\gamma + \sigma_p + \sigma_\alpha \dots \dots \dots (2-11)$$

Dengan tampang lintang total merupakan jumlah tampang lintang hamburan elastik (n,n), tampang lintang hamburan tak elastik (n,n' γ) dan tampang lintang reaksi absorpsi yang meliputi reaksi (n,2n), (n,fisi), (n,n α), (n, γ), (n,p) dan (n, α).

2.7. Tampang Lintang Removal (σ_r)

Tampang lintang removal (removal cross section) digunakan untuk mengukur atenuasi neutron cepat. Tampang lintang removal merupakan ukuran kebolehjadian tumbukan-tumbukan dimana neutron cepat mengalami proses hamburan elastik maupun tak elastik kemudian mengalami perlambatan (slowing down). (Tjipta. 1982)

Besarnya tampang lintang removal secara teori adalah jumlah tampang lintang hamburan tak elastik dengan fraksi tampang lintang neutron fisi yang dominan. ^(Tjipta. 1982)

Sedangkan secara pengamatan didapatkan bahwa :

Tampang lintang removal = 2/3 (tampang lintang hamburan elastik + tak elastik) + (tampang lintang tangkapan untuk neutron-neutron yang berenergi 8 - 10 MeV).

Untuk bahan-bahan yang mempunyai massa $A > 10$, harga σ_r didapat dengan menggunakan rumus : ^(Tjipta. 1982)

$$\sigma_r = 0,35 A^{0,42} \text{ barn} \dots \dots \dots (2-12).$$

2.8. Tampang lintang removal makroskopik (Σ_r)

Tampang lintang removal makroskopik menyatakan peluang neutron berinteraksi dengan materi per satuan panjang. ^(Lamarsh. 1966)

Jadi tampang lintang removal makroskopik didefinisikan berbanding terbalik dengan panjang relaksasi (λ)

$$\Sigma_r = 1/\lambda \dots \dots \dots (2-13)$$

Tampang lintang removal makroskopik dapat didekati dengan persamaan : ^(T. Sztarieskai dkk. 1993)

$$\Sigma_r = \frac{0,602 \sigma_r \rho}{A} \dots \dots \dots (2-14)$$

dengan σ adalah tampang lintang mikroskopis, ρ adalah berat jenis material dan A adalah berat atom.

Jika suatu bahan terkena radiasi neutron cepat dari sebuah sumber titik isotropik, maka akan memenuhi persamaan: ^(T. Sztarieskai dkk. 1993)

$$\phi = \frac{S \cdot e^{-\Sigma r \cdot d}}{4\pi r} \dots \dots \dots (2-15a)$$

dengan ϕ adalah fluks yang mengalir pada jarak r dari sumber ($n/cm^2 \cdot \text{detik}$), S adalah kekuatan sumber (n/detik), d adalah tebal bahan yang terkena radiasi (cm) dan Σr adalah tampang lintang removal makroskopik (cm^{-1}).

Persamaan (2-15a) dapat dituliskan :

$$\phi = K \cdot e^{-d \cdot \Sigma r} \dots \dots \dots (2-15b)$$

dengan $K = \frac{S}{4\pi r^2}$

Harga tampang lintang removal makroskopik dapat dihitung dengan mengambil logaritma pada kedua ruas persamaan (2-15b) menjadi :

$$\ln \phi = \ln K - \Sigma_r \cdot d \dots \dots \dots (2-15c)$$

yang merupakan persamaan garis lurus.

$$Y = a + bx$$

dengan $Y = \ln \phi$, $a = \ln K$ dan $b_x = -\Sigma_r \cdot d$.

Bila kita variasi harga ketebalan pada persamaan (2-15b), maka harga fluks (ϕ) akan ikut bervariasi sehingga harga tampang lintang removal makroskopik (Σ_r) merupakan slope dari garis tersebut. Harga fluks (ϕ) dapat ditentukan dengan metode Analisa Pengaktifan Neutron Cepat (APNC).

2.9. Prinsip Dasar Analisa Pengaktifan Neutron Cepat

Dalam analisa pengaktifan neutron cepat, cuplikan yang akan analisa diiradiasi dengan neutron cepat yang dihasilkan oleh generator neutron. Akibat iradiasi sebagian inti dalam cuplikan menangkap neutron dan bersifat radioaktif. Setelah paparan radiasi dianggap cukup, iradiasi dihentikan dan cuplikan dikeluarkan dari ruang iradiasi. Cuplikan sekarang mengandung unsur-unsur yang dapat memancarkan sinar radioaktif. Sinar γ yang dipancarkan berbagai unsur dalam cuplikan, dianalisa secara spektrometri- γ . Analisa kualitatif didasarkan pada energi- γ yang dipancarkan dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi unsur yang terbentuk dan reaksi yang terjadi. Sedangkan analisa kuantitatif dilakukan dengan menentukan intensitas sinar- γ . Dari kedua analisa didapatkan berbagai informasi tentang cuplikan.

2.9.1. Persamaan-persamaan untuk Analisa Pengaktifan Neutron Cepat

Akibat dari penyinaran neutron pada cuplikan, maka sebagian unsur dalam cuplikan menjadi radioaktif. Tetapi karena pada saat yang sama radionuklida yang terbentuk meluruh, maka laju netto pembentukan radionuklida adalah selisih antara laju produksi dengan laju peluruhannya.

Secara matematis dapat ditulis:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dn}{dt} \right) &= \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{produksi}} - \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{peluruhan}} \\ &= \phi \sigma N_t - \lambda n \dots \dots \dots (2-16) \end{aligned}$$

dengan n adalah jumlah inti radioaktif yang terbentuk, ϕ adalah fluks neutron ($n/\text{cm}^2 \cdot \text{detik}$), σ adalah tampang lintang aktivasi (cm^2), N_t adalah jumlah nuklida sasaran dan λ adalah tetapan integrasi radionuklida yang terbentuk.

Persamaan (2-16) adalah persamaan diferensial orde 1 tingkat pertama. Jika waktu iradiasi adalah t_{ir} dan inti stabil sebelum iradiasi ($n = 0$ pada $t = 0$), maka penyelesaian persamaan (2-16) adalah :

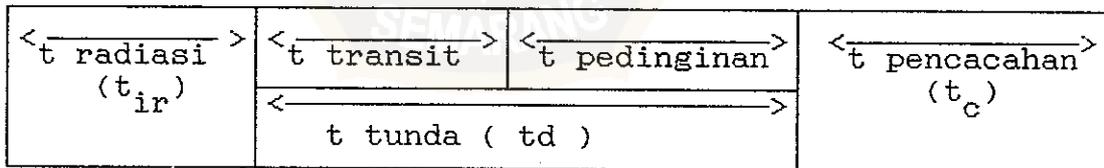
$$n = \frac{\phi \sigma N_t}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{ir}}) \dots \dots \dots (2-17)$$

dan aktivitasnya adalah:

$$A_{ir} = \lambda n = \sigma \phi N_t (1 - e^{-\lambda t_{ir}}) \dots \dots \dots (2-18)$$

Harga A_{ir} dalam persamaan (2-18) adalah aktivitas pada saat berakhirnya iradiasi. Dalam eksperimen untuk pencacahan tepat pada saat berakhirnya iradiasi jelas tidak mungkin. Dari sistem pneumatik yang ada, untuk melakukan pencacahan, cuplikan harus dipindahkan dari ruang iradiasi ke ruang pencacahan. Waktu pemindahan ini dikenal sebagai waktu transit dan harus diketahui secara cermat pada analisis unsur dengan waktu paruh yang pendek (dalam orde detik).

Untuk memperoleh informasi maksimum pada analisis unsur dengan umur paro yang panjang, peneliti sengaja memberikan waktu tunda yang disebut waktu pendinginan, sebelum cuplikan dicacah.



Gambar 2-3 : Diagram waktu analisa pengaktifan neutron

Aktivitas radionuklida pada saat t_d setelah berakhirnya waktu iradiasi adalah :

$$A_d = A_{ir} e^{-\lambda t_d}$$

$$= \sigma \phi N_t (1 - e^{-\lambda t_{ir}}) e^{-\lambda t_d} \dots \dots \dots (2-19)$$

Sedang jumlah cacah kejadian peluruhan selama waktu t_c adalah :

$$C = \int_t^{t_c} K A_d e^{-\lambda t_d} dt$$

$$= K \sigma \phi N_t (1 - e^{-\lambda t_{ir}}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c}) \dots \dots \dots (2-20)$$

dengan $K = \epsilon Y$ adalah tetapan yang mengandung efisiensi detektor (ϵ) dan prosentase peluruhan Gamma, yang disebut Gamma yield (Y). Sedang jumlah nuklida sasaran dapat dihitung dengan kesetaraan mol :

$$N_T = \frac{m N_A}{B_A} a \dots \dots \dots (2-21)$$

dengan m adalah massa cuplikan (dalam gram), N_A adalah bilangan Avogadro, B_A adalah berat atom unsur cuplikan, dan a adalah kelimpahan relatif dari isotop cuplikan.

Persamaan (2-20) dapat ditulis secara lengkap sebagai berikut :

$$C = \frac{m N_A}{B_A} a \frac{\sigma \phi Y \epsilon}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{ir}}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c}) \dots (2-22)$$

Persamaan (2-22) dipandang sebagai persamaan dasar dan persamaan akhir dari analisa pengaktifan neutron.

2.9.2. Pengukuran Fluks Neutron Cepat Dengan Metode Aktivasi

Dengan menggunakan metode aktivasi, besar fluks neutron bisa didapatkan dari persamaan (2-22).

$$C = \frac{m N_A}{B_A} a \frac{\sigma \phi Y \varepsilon}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{ir}}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c}) \dots (2-22)$$

Karena data yang tersedia adalah umur paro ($T^{1/2}$), maka diperlukan konversi tetapan peluruhan λ dalam $T^{1/2}$ dengan persamaan :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T^{1/2}} \dots \dots \dots (2-23)$$

Sehingga persamaan (2-22), dengan mengatur suku-sukunya menjadi :

$$C = \left[\frac{N_A}{\ln 2} \right] \sigma \varepsilon \phi m \left[\frac{a Y T^{1/2}}{B_A} \right] \times (1 - e^{-\ln 2 \cdot t_{ir} / T^{1/2}}) e^{-\ln 2 \cdot t_d / T^{1/2}} (1 - e^{-\ln 2 \cdot t_c / T^{1/2}}) \dots (2-24)$$

Jadi besarnya fluks adalah :

$$\phi = \frac{c \cdot \ln 2 \cdot B_A}{N_A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot m \cdot Y \cdot T^{1/2}} \times \frac{1}{(1 - e^{-\ln 2 \cdot t_{ir}/T^{1/2}}) e^{-\ln 2 \cdot t_d/T^{1/2}} (1 - e^{-\ln 2 \cdot t_c/T^{1/2}})} \dots (2-25)$$

Selanjutnya m didapat dari tabel yang besarnya tergantung masing-masing foil, C dari cacah terukur, dan ϵ dari kalibrasi efisiensi detektor, sedangkan σ didapat dari tabel yang harganya tergantung dengan energi gamma yang dipancarkan.

2.10. Kelebihan dan Kelemahan Metode Aktivasi

Sebagai suatu metode pengukuran tampang lintang removal makroskopik, metode aktivasi tidak lepas dari kelebihan dan kekurangan. Menurut Nargolwalla, metode aktivasi memiliki kelebihan dalam selektivitas (kemampuan memilih), akurasi (ketepatan), presisi (kesesuaian), serta sensitivitas (kepekaan).

Dalam praktek, metode ini bisa dilakukan dengan sedikit cuplikan, tidak terpengaruh bentuk kimia cuplikan, dapat melacak lebih dari satu reaksi pada saat yang bersamaan, serta hasilnya bisa diperoleh dalam waktu yang cepat. Sedangkan kelemahannya memerlukan biaya awal yang tinggi, serta tidak dapat mencirikan ikatan kimia cuplikan.

2.11. BETON

Beton adalah sebuah struktur material yang telah dipergunakan secara luas yang pada dasarnya terdiri dari sebuah bahan pengikat dan mineral-mineral pengisi. ^(Krishna, 1983) Mineral-mineral pengisi dari beton terdiri dari pasir, kerikil dan material-material tambahan yang mempunyai ciri-ciri tersendiri yang dapat ditambahkan untuk keperluan-keperluan khusus. Material-material tambahan antara lain seperti serbuk besi dan lain-lain. Bahan pengikat adalah campuran antara semen dan air. Mutu beton ditentukan oleh jenis material-material penyusun, komposisi atau perbandingan yang tepat antara material-material penyusun dan cara pembuatan. Beton penahan radiasi adalah komponen struktur dari beton yang merupakan bagian dari suatu sistem pengamanan yang diperlukan pada kegiatan yang berhubungan dengan radiasi pengion dan radiasi neutron untuk melindungi kesehatan manusia dari penyinaran lebih yang membahayakan ^(SKSNI, 1991)

2.11.1. Semen

Semen merupakan bubuk halus yang diperoleh dengan menggiling *klinker* dengan batu gips sebagai bahan tambahan dalam jumlah yang cukup. *Klinker* didapat dari pembakaran suatu campuran yang baik dan merata antara kapur dan bahan-bahan yang mengandung silika, alumina dan oksida besi hingga tersinter.

Semen merupakan bagian yang cukup penting dalam pembuatan beton karena bahan inilah yang akan mempersatukan butir-butir pasir dan kerikil menjadi satu kelompok, karena dalam semen terdapat bahan-bahan pengikat yang dapat menjadi keras jika diberi air.

2.11.2. Air

Air untuk pembuatan beton tidak boleh mengandung minyak, asam, alkali, garam, bahan-bahan organik dan bahan-bahan lain yang merusak beton. Sebaiknya digunakan air bersih yang dapat diminum, tawar, tidak berbau. Tapi belumlah pasti bahwa air yang tidak diminum tidak dapat digunakan. Untuk itu dianjurkan untuk mengirimkan contoh air itu ke lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang dipakai untuk diteliti sampai beberapa jauh air itu mengandung bahan-bahan yang dapat merusak beton.

2.11.3. Kerikil dan Batu Pecahan

Kerikil dan batu pecahan adalah bagian-bagian batu dengan diameter 5 mm hingga 30 mm. Kerikil dapat ditemui di dasar sungai sedang batu pecahan dibuat orang atau menggunakan mesin pemecah batu.

2.11.4. Pasir

Pasir merupakan bahan batuan berukuran kecil dengan ukuran butiran ≤ 5 mm. Pasir dapat berupa pasir alam sebagai hasil desintegrasi alam dan batu-batuan atau

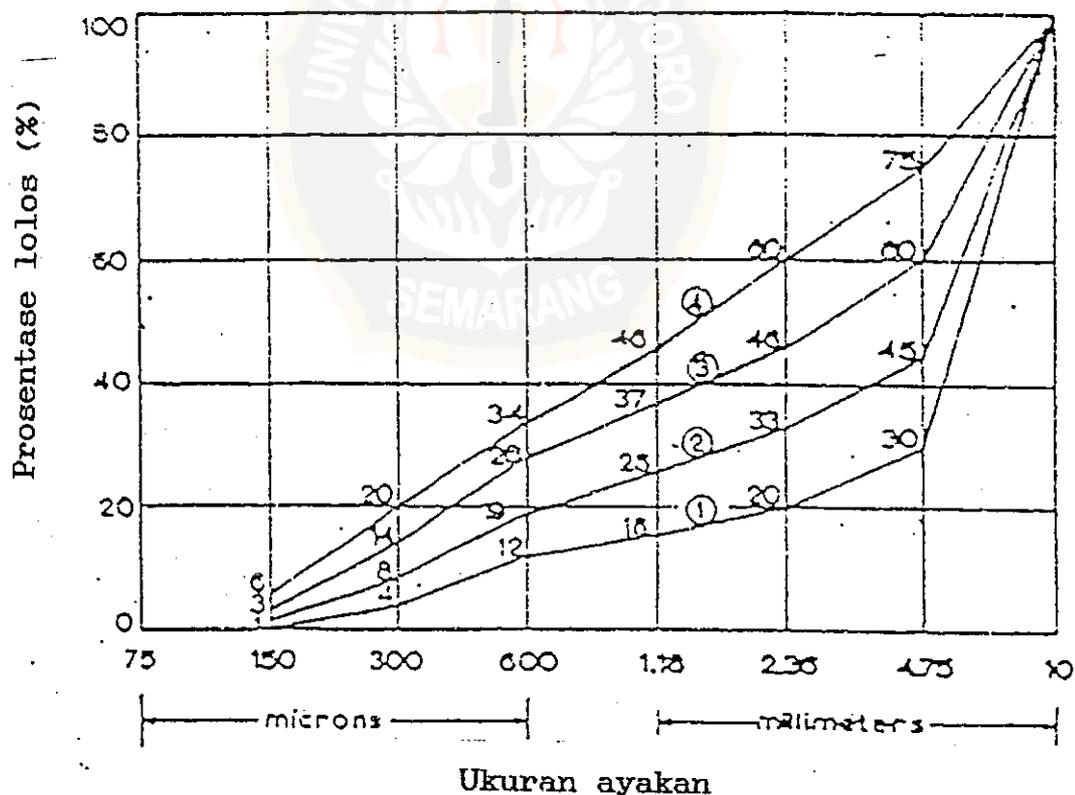
berupa pasir pecahan batu yang dihasilkan oleh mesin pemecah batu.

2.11.4.1. Syarat-syarat Pasir

- Pasir harus terdiri dari butir-butir yang tajam dan keras. Bentuk tajam diperlukan untuk kaitan yang baik dalam adukan. Butirannya harus bersifat kekal artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh perubahan cuaca yaitu terik matahari dan hujan.
- Pasir tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5 % (terhadap berat kering). Lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan dengan lubang 0,063 mm. Apabila kadar lumpurnya melebihi 5 % maka pasir harus dicuci.
- Pasir tidak boleh mengandung bahan-bahan organik terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan pengujian warna dari Abranms-Harder. Bahan-bahan organik dapat mengadakan reaksi dengan senyawa-senyawa dari semen hingga berakibat berkurangnya kualitas adukan dan betonnya.
- Pasir harus bergradasi atau terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya. Apabila diayak dengan susunan ayakan - 150 (dengan ukuran lubang dalam mm berturut-turut 31,5 - 16 - 8 - 4 - 2 - 1 - 0,500 - 0,250) harus memenuhi syarat-syarat berikut :
 1. sisa diatas ayakan 4 mm \geq 2 % berat
 2. sisa diatas ayakan 1 mm \geq 10 % berat
 3. sisa diatas ayakan 0,25 mm antara 80%-90% berat

2.11.4.2. Gradasi

Gradasi yang baik dapat mencapai campuran pasir dan kerikil yang mampat. Butir-butir kecil dapat mengisi rongga-rongga diantara butir-butir besar sehingga penggunaan pasta semen akan berkurang yang berakibat semakin kurang pula susut pengerasan beton karena bahan tidak menyebabkan susut. Pororitas juga akan berkurang pada penggunaan bahan batuan bergradasi baik. Berdasarkan standar A.S.T.M (American Society For Testing Materials) maka untuk agregat dengan ukuran butiran maksimum 10 mm yang layak digunakan sebagai bahan adukan beton memenuhi kurva gradasi.



Gambar 2-4: Kurva Gradasi Untuk Agregat 10 mm

Keterangan gambar 2-4

Ukuran Ayakan	Prosentase lolos ayakan (%)			
	Gradasi 1	Gradasi 2	Gradasi 3	Gradasi 4
10 mm	100	100	100	100
4,75 mm	30	45	60	75
2,36 mm	20	33	46	60
1,18 mm	16	28	37	46
600 μm	12	19	26	34
300 μm	4	8	14	20
150 μm	0	1	3	6
75 μm				

